

Nebojsa Đuranović¹

**SPECIFIC REQUIREMENTS FOR TESTING OF RC ELEMENTS REINFORCED
WITH COMPOSITE FRP BARS**

SUMMARY

This paper studies specific experimental requirements for testing RC beams when FRP bars are used in lieu of steel reinforcement. FRP reinforcement main types and positive and negative features of the FRP material from investigator point of view have been discussed. Some of the experimental problems related to bond between the FRP bars and the surrounding concrete, low modulus of elasticity and large deformability of the FRP material and shear force transfer and experimental way of distinguishing between shear and bending deflection have been pointed out. Typical results obtained in the test program are also presented.

Nebojsa Đuranović¹

**O SPECIFIČNOSTIMA ISPITIVANJA AB ELEMENATA ARMIRANIH
KOMPOZITNIM FRP ARMATURAMA**

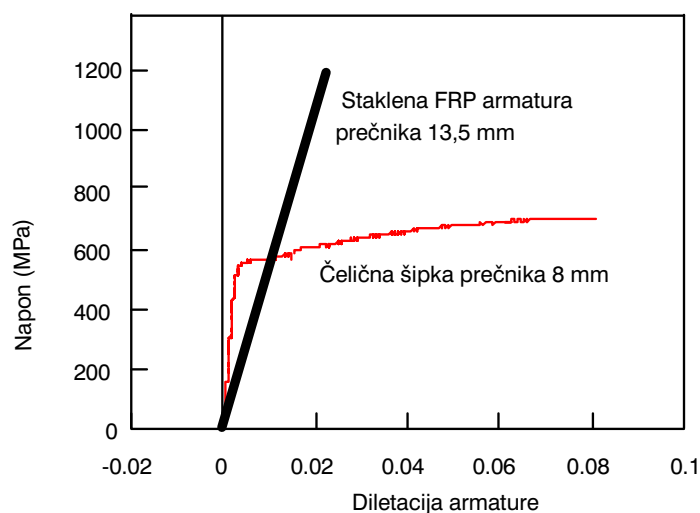
REZIME

¹ Lecturer, Faculty of Civil Engineering, University of Montenegro, Podgorica, Montenegro, Yugoslavia, Cetinjski put bb, Phone/Fax +381 81 243 718.

1. Uvod

U posljednje vrijeme na više mjesta u svijetu sprovode se istraživanja u oblasti primjene alternativnih materijala kao glavne, podužne i poprečne, ali i konstruktivne armature betonskih presjeka. Tu se prvenstveno radi o tzv. kompozitnim materijalima koji se sastoje od osnove, koju čini plastično-smolasti materijal, na koju se, ili kroz koju se, provlače vlakna drugog materijala, dajući mu tako karakteristike koje čine kombinaciju karakteristika osnovnih materijala. Mehaničke i fizičke osobine vlakana u ogromnoj mjeri određuju karakteristike završnog proizvoda. Vezivni materijali ne poboljšavaju nosivost završnog proizvoda ali utiču na njegov modul elastičnosti. Na samom početku treba naglasiti da se ovdje pod vlaknima ne podrazumijevaju kratka vlakna koja se obično koriste kao aditiv za poboljšavanje određenih karakteristika samog betona već kontinuirana vlakna čiji se prečnici, kao i kod predhodno pomenutih, mjere mikronima. Završni proizvod dobija se u formi armaturnih šipki i/ili uzengija.

Veća upotreba kompozitnih FRP armatura (na engleskom **Fibre Reinforced Plastics**, to jest *plastike ojačane vlaknima*) kao posledicu ima značajno interesovanje projekatanta i istraživača, a posledica toga je i naglo proširenje područja njene primjene. Njihova znatno veća čvrstoća na zatezanje nego čelika, otpornost na koroziju, elektro i magnetna neutralnost (providnost), mala specifična težina, kao i velika otpornost na zamor čine je veoma privlačnim materijalom za mnoge građevinske objekte. Sa druge strane, njihove osobine (slika 1) kao što su npr. potpuno neposjedovanje duktilnosti i potpuna linearna elastičnost sve do tačke kidanja, zatim, u većini slučajeva, znatno niži moduo elastičnosti nego čelika, kao i nedovoljna ispitnost cijelog niza drugih osobina (prijanjanje za beton, otpornost na vatru, postojanost itd), predstavljaju značajan izazov sa kojim se sreću projektanti, što sve zajedno dovodi do velikog inteziviranja istraživačkog rada sa ovim materijalima širom svijeta.



Slika 1. Dijagrami napon-dilekacija za čeličnu i kompozitnu FRP armaturu

Pored pobrojanih, ovi materijali posjeduju još niz drugih problema, kao što su: relativno visoka cijena, granična čvrstoća pri dugotrajnim opterećenjima im je nedovoljno ispitana, problemi obradljivosti - npr. kod staklenih armatura zbog opasnosti

od povreda stalenim vlaknima, znatno niža čvrstoća na smicanje nego kod čelika, nepostojanje standarda za projektovanje kao u slučaju čeličnih armatura itd.

Trenutno se u svijetu proizvodi nekoliko vrsta FRP armatura. One imena obično dobijaju prema vrsti vlakana od kojih su napravljena:

a) Staklene FRP armature - (*Glass FRP*) - Modul elastičnosti im se kreće u rasponu 31 do 63 GPa, čvrstoća na zatezanje između 600 do 2100 MPa dok im je deformacija na granici kidanja između 1,8 i 4,0%. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im je negativan i iznosi $-15 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$.

b) Karbonatne FRP armature - (*Carbon FRP*) - to su FRP armature za koje se koriste karbonatna vlakna. One imaju najveći modul elastičnosti od svih plastičnih armatura i on može da ide do 230 GPa. Deformacija na granici kidanja im je između 1,2 i 2,0%, dok im je čvrstoća na granici kidanja ide do 3000 MPa. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im iznosi $0,2 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$.

c) Aramidске FRP armature - (*Aramid FRP*) - imaju vlakna napravljena od aramida, a osnovna prednost u odnosu na karbonatne armature im je veća deformacija na granici kidanja kao i određena nelinearnost između dilatacija i napona u neposrednoj blizini granice kidanja, što bi moglo biti značajno sa stanovišta duktilnosti. Modul elastičnosti im se kreće u rasponu 73 do 165 GPa, čvrstoća na zatezanje između 2600 i 3400 MPa dok je deformacija na granici kidanja između 1,5 i 5,3%. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im je negativan i iznosi $-15 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$.

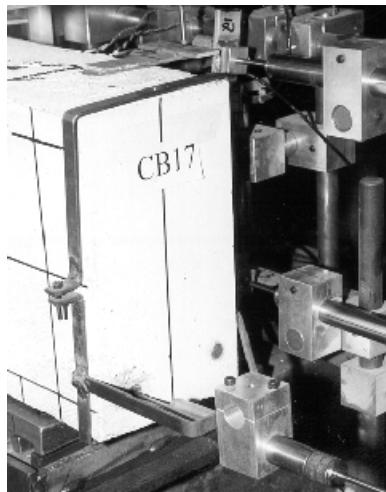
Prilikom korišćenja ovakvih materijala, pred eksperimentatorima se javljaju posebni zahtjevi pri ispitivanjima, zahtjevi koji su u većini slučajeva direktna posledica predhodno navedenih osobina po kojima se kompozitne armature razlikuju od čeličnih. Najčešći dodatni zahtjevi kod ispitivanja ovako armiranih AB elemenata su vezani sa problemom utvrđivanja nivoa sidrenja i prijanjanja kompozitne armature (uključujući registrovanje nivoa deformacija u zonama krajeva armature), problemom osmatranja i registrovanj ponašanje greda usled sila smicanje, problemom osmatranja velikih ugiba (koji se u ovakvim elementima redovna pojava), problemom znatnog pomjeranja pokretnih oslonaca usled visokog nivoa ispucalosti elementa i povećanih ugiba u odnosu na uobičajene armature, problemom praćenja neizbježnog krto (i "po betonu" i "po armaturi") loma pri veoma velikim nivoima ugiba i deformacija (što takođe nije slučaj kod elemenata armiranih čelikom), problem registrovanja znatnih obrtanja oslonaca i tome slično.

2. Mjerenje nivoa prijanjanje i gubitka sile veze

Znatno viša čvrstoća FRP šipki na zatezanje kao posledicu ima potrebu za većim dužinama sidrenja kod ove, nego kod obične čelične armature. Sa druge strane, smanjenja ostvarenih napona prijanjanja FRP armature u odnosu na čelične armature

istih presjeka, je veoma bitna karakteristika koja praktično dovodi do povećanja minimalne dužine sidrenja. Nedostatak prijanjanja ima značajne konsekvence na ponašanje uzoraka i može direktno voditi do iznenadnog loma u presjeku¹. Po svojoj suštini, problemi prijanjanja betona za FRP armaturu su povezani sa visokim Poissonovim koeficijentom FRP materijala i mehaničkim karakteristikama rebara same armature. Prihvatanje napona zatezanja u kompozitnim armaturama je dalje komplikovano zbog nemogućnosti sidrenja ovih armatura na način uobičajen za čelične armature. Sidrenje je praktično nemoguće zbog nepostojanja ni najmanjeg nivoa duktilnosti u FRP materijalu, što sprečava pravljenje kuka i krivina na krajevima armaturnih šipki, tako da se one ostavljaju prave.

Proces osmatranja se sprovodi dvojako: posmatranjem i registrovanjem pomjeranja krajeva armaturnih šipki i mjerenjem nivoa deformacija u samoj blizini kraja šipke. U cilju mjerenja pomjeranja njenih krajeva, FRP armaturne šipke se vode do samog kraja kalupa, tako da se nakon nakon izlivanja betona i skidanja oplata može neposredno pristupiti kraju armature. Pokušaji da se krajevi armature ostave na određenoj udaljenosti od kraja kalupa obično dovode do problema prilikom montiranja "posrednika" između armature i mjernog uređaja. Zbog znatnih pomjeranja kraja grede ugibomjere koji služe za mjerenje pomjeranja armature treba postaviti da se oslanjaju na samu AB gredu, jer se jedino na taj način mogu izmjeriti stvarna tj. relativna pomjeranja kraja armaturne šipke u odnosu na okolni beton. Izgled i način postavljanja sistema za utvrđivanje horizontalnih pomjeranja kraja armature prikazan je na slici 2.

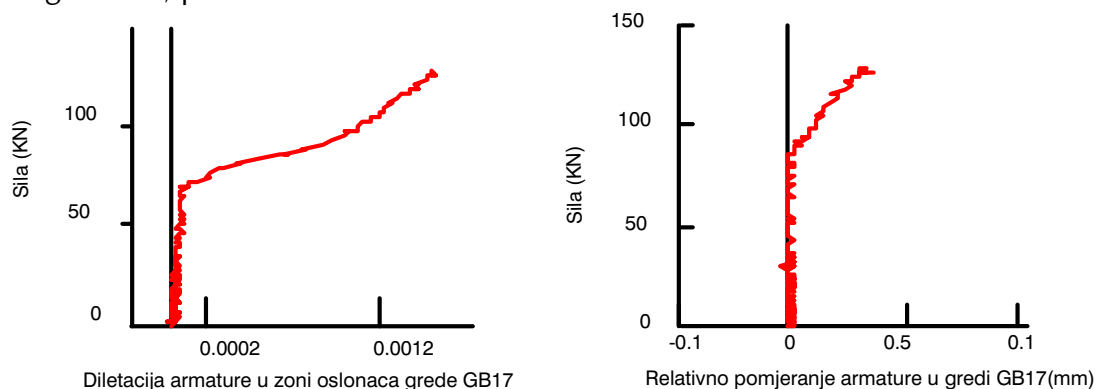


Slika 2. Oprema za mjerenje relativnog pomjeranja FRP šipki

U cilju određivanja napona prijanjanja ostvarenih na krajevima FRP šipki, koji u stvari predstavljaju napone koji se na posmatranom mjestu predaju okolnom betonu i koji ustvari omogućavaju da ne dođe do loma veze tj. gubitka prijanjanja, najpogodnije je koristiti mjerne trake zalijepljene na površinu armaturne šipke. One treba da budu što manje veličine kako bi što manje uticale na posmatranu vezu beton - armatura.

Mjerenja su pokazala da su promjene nivoa ostvarenih napona po dužini armaturne šipke drastična tako da je u cilju mjerenja najvećih nivoa dilatacija odnosno napona neophodno postaviti najmanje 4 mjerne trake na međusobnom rastojanju od 30

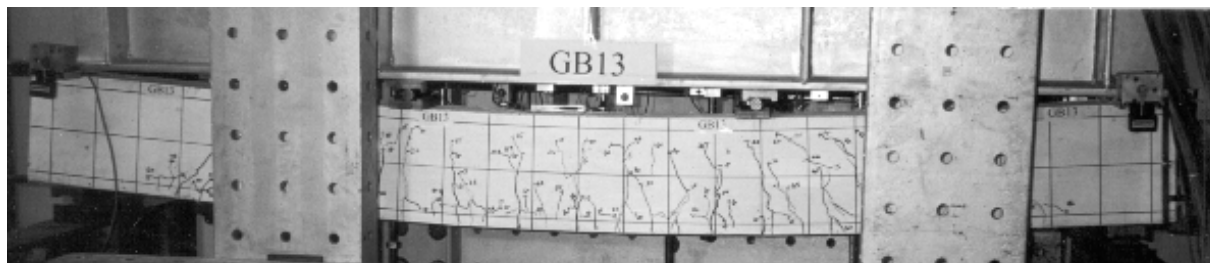
do 50 mm, tako pokrivajući krajnjih 170 - 200 mm armature. Tipični rezultati mjerenja, tj. dilatacije ostvarene pri krajevima FRP armaturnih šipki kao i proklizavanja armature i okolnog betona, prikazani su na slici 3.



Slika 3. Dilatacija kraja FRP šipke i relativno pomjeranje između armature i betona

3. Specifičnosti kod mjerenja ugiba i pokretni oslonac

Izražena deformabilnost tj. obično niska vrijednost modula elastičnosti kompozitne armature, kod ovakvih AB greda dovodi do veoma izraženih ugiba koji mogu neposredno pred fazu loma grede biti i cijeli red veličine veći od onih na odgovarajućim AB gredama armiranim čeličnom armaturomⁱⁱ. Ugibi kod ovakvih greda mogu ići čak do $L/25$. Fizički osjećaj o obliku i izgledu deformisanog nosača pri ovakvim ugibima može se steći sa slike 4.



Slika 4. Deformisani oblik grede

Kao posledica velikih ugiba i znatne isprskalosti nosača javljaju se velike rotacije u osloncima i znatna pomjeranja pokretnog oslonca. Ta pomjeranja su kod proste grede reda veličine $L/15$, pa je potrebno obezbijediti i oslonce koji će ih omogućiti. Ležišta koja ne omogućavaju potrebna horizontalna pomjeranja, uz minimum primijenjene horizontalne sile, ili ta pomjeranja potpuno onemogućavaju (npr. u situaciju nedovoljne veličine ležišta oslonca) praktično dovode do promjene konstruktivnog sistema, i u rezultate testova uvode sistemsku grešku koju je veoma teško otkloniti.

Posledica velikih ugiba je i postojanje veoma izražene vrijednosti horizontalnog pojeranja na posmatranom mjernom mjestu. Zapravo, pri testiranjima greda armiranih kompozitnim armaturama umjesto vertikalnog ugiba određuje se vrijednost vertikalne komponente ukupnog pomjeranja na posmatranom mjestu. Poistovjećivanje vertikalne

komponente pomjeranja i najvećeg pomjeranja unosi u analizu rezultata metodičku grešku koja se naknadno može računski otkloniti.

4. Razdvajanje ugiba od transverzalnih sila i momenata savijanja

Problem utvrđivanja uticaja transverzalnih sila na ukupne ugibe je posebno komplikovanⁱⁱⁱ. Propisi za dimenzionisanje presjeka koji su trenutno u upotrebi, kako naši tako i inostrani, za definisanje ostvarenih transverzalnih sila i smičućih napona redovno koriste eksperimentalne podatke o nosivosti betona na smicanje, dobijene na osnovu testova izvršenih na presjecima armiranim čeličnim armaturama. Zato se problemu prijema transverzalnih sila kod presjeka armiranih kompozitnim armaturama treba prilaziti nezavisno od posmatranja nosivosti ovako armiranog presjeka na savijanje, gdje se eksperimentalna osnova korišćena za dimenzionisanje presjeka armiranih čeličnim armaturama može koristiti u skoro nepromijenjenom obliku i pri dimenzionisanju presjeka armiranih FRP šipkama^{iv}. Prilikom razdvajanja ugiba od sila smicanja od ukupnih ugiba ostvarenih u presjeku (što se obično eksperimentalno radi samo kod "debelih" greda), moguće je koristiti par horizontalno postavljenih ugibomjera koji se oslanjaju na gornjoj i donjoj strani testirane grede kako bi se izmjerila relativna pomjeranja (tj. obrtanja) među njima. Uprosječene ugibe, sračunate iz relativnih obrtanja presjeka, izmjerene u dva susjedna presjeka, treba oduzeti od ukupnog ugiba izmjenjenog vertikalno postavljenim ugibomjerom u istom presjeku i tako dobiti ugibe koji su posledica momenata savijanja u presjeku. Tako dobijeni rezultati omogućavaju nezavisnu verifikaciju računanja ugiba usled momenata savijanja i onih usled transverzalnih sila.

Zaključci

Priroda i fizičko - mehaničke karakteristike kompozitnih FRP armatura zahtijevaju poseban oprez pri njihovom korišćenju, kako u stvarnim konstrukcijama tako i u cilju njihovog daljnjeg istraživanja. Pri pripremi testova posebno se u razmatranje moraju uzeti znatno veće čvrstoće na zatezanje i manji moduo elastičnosti ovih materijala, kao domonirajući faktor pri ispitivanju. Problem utvrđivanja nivoa prijanjanja betona i kompozitne armature, određivanje pomjeranja nosača, kao i razdvajanje ugiba od transverzalnih sila i momenata savijanja zahtijevaju metode i postupke ispitivanja konstrukcija koji se obično ne koriste kod ispitivanja elemenata armiranih klasičnim armaturama.

Literatura:

ⁱ N. Đuranović, K. Pilakoutas i P. Waldron: "Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars", *"Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement in concrete structures"*, str. 479-486, okt. 1997, Sapporo, Japan.

ⁱⁱ N. Đuranović: "Ojačavanje greda armiranih kompozitnim FRP šipkama pomoću spoljašnjih uzengija", broj 2/1998 "*Tehnika*", Društvo inž. i tehn. Jugoslavije, Beograd.

ⁱⁱⁱ J. Case and A. H. Chilver, *Strength of materials and structures*, Edward Arnold, I izdanje, str. 237 - 238, London, 1970.

^{iv} Laralde, J. itd: "Fiberglass Reinforced Plastic Rebars in lieu of Steel Bars", "Structural Materials, Proceedings of the session related to structural materials at *Structures Congress 1989*", Orofino, J.F., ASCE, USA, 1989, strana 261 - 269.